

П.В. Михайлов, А.А. Муравьев, Ю.Л. Масленникова, Е.В. Круглова

### Микроциркуляция и реологические свойства крови у лиц с разным уровнем аэробной работоспособности

Известно, что уровень аэробной работоспособности во многом зависит от эффективной доставки кислорода к работающим мышцам. На эффективность транспорта кислорода на уровне микроциркуляции влияют реологические свойства крови, определяющие ее текучесть, а также резерв дилатации артериол, определяющий пропускную способность сосуда. В представленной работе рассматриваются вышеуказанные параметры у лиц с разным уровнем максимального потребления кислорода.

**Ключевые слова:** максимальное потребление кислорода, частота сердечных сокращений, микроциркуляция, артериоло-венулярное соотношение, гемореология, вязкость крови, деформируемость эритроцитов

P. V. Mikhailov, A. A. Muravyov, Ju. L. Maslennikova, E. V. Kruglova

### Microcirculation and Rheological Properties of the Blood of Persons with a Different Level of Aerobic Working Capacity

As it is generally known an aerobic working capacity depends on the oxygen transport ability of the blood. Hemoreological characteristics and microcirculation parameters have the influence on the effectiveness of oxygen transportation. In this study is investigated transportation potential of the blood of a person with a different level of maximum oxygen consumption.

**Key words:** maximal oxygen consumption, heart rate, microcirculation, arteriolar-venular ratio, hemoreology, blood viscosity, red blood cell deformability, hematocrit, hemoglobin, effectiveness of oxygen transportation.

Под влиянием оптимальных физических нагрузок в организме спортсмена происходят адаптационные изменения на уровне органов и тканей, которые способствуют повышению эффективности работы физиологических систем, что, в свою очередь, является основой для роста спортивного результата. Характер изменений, происходящих в организме, зависит от специфики спортивной деятельности. В видах спорта с преимущественным проявлением выносливости у квалифицированных атлетов увеличено в размерах сердце и отмечена более высокая плотность капилляров в мышцах, чем у нетренированных лиц [12]. В состоянии покоя у данной категории лиц наблюдается снижение ряда гемодинамических показателей, что свидетельствует о менее напряженном функционировании сердечно-сосудистой системы в покое [4].

Транспорт кислорода и питательных веществ к работающим мышцам, а метаболитов от мышц обеспечивает система крови. На уровне микрососудов эффективность доставки кислорода и питательных веществ к работающим мышцам зависит от реологических свойств крови, а также от микроциркуляторного звена, являющегося ключевым в процессе тканевого обмена. Проблемам

гемореологии и микроциркуляции посвящено много работ, но крайне малая их часть касается взаимосвязи вышеупомянутых показателей с работоспособностью индивида. Так как доля аэробной энергопродукции является преобладающей в общей сумме энергопотенциала, то именно максимальная величина аэробных возможностей (МПК) организма является основным критерием его физического здоровья [2].

Таким образом, исследование взаимосвязи гемореологических и микроциркуляторных показателей с величиной аэробной работоспособности является важной практической задачей, связывающей процессы, происходящие в микроциркуляторном русле с МПК, являющимся не только величиной аэробного потенциала спортсмена, но и количественным выражением уровня здоровья человека.

**Цель:** исследование микроциркуляции и реологических свойств крови у лиц с разным уровнем аэробной работоспособности.

#### Материал и методы

В исследовании приняли участие мужчины в возрасте 18-28 лет. В ходе исследования были сформированы 3 группы. Первую группу соста-

вили квалифицированные спортсмены, тренирующиеся на выносливость (n=13), вторую группу – представители спортивных игр (n=11), а контрольную группу – нетренированные лица (n=11). В группах спортсменов стаж занятий избраным видом спорта составлял 5 лет и более. У испытуемых определяли антропометрические показатели, гемодинамические показатели в состоянии покоя: частоту сердечных сокращений (ЧСС), артериальное давление (АД), рассчитывали АД среднее и двойное произведение (ДП). Для исследования аэробной работоспособности применяли велоэргометрический тест со ступенчато возрастающей мощностью (25 Вт в минуту) с определением  $PWC_{170}$  и последующим вычислением величины максимального потребления кислорода (МПК). На основании ЧСС, зарегистрированной во время велоэргометрического теста, рассчитывали пульсовый критерий экономичности [5].

Микроциркуляцию (МЦ) конъюнктивы глазного яблока исследовали в состоянии покоя. Установка включала в себя микроскоп с цифровым окуляром (модель DCM500), подключенным к персональному компьютеру. Анализ полученных изображений производили в Photoshop 6.0: измеряли диаметр параллельно идущих артериол и венул с последующим расчетом артериоло-венулярного соотношения (АВС):

$$\dot{A}\dot{A}\dot{N} = \frac{DA}{DB}, \text{ где } DA - \text{ диаметр артериолы, } DB$$

- диаметр вены.

При исследовании гемореологических показателей у испытуемых определяли вязкость цельной крови ( $\eta$ ), вязкость суспензии эритроцитов с  $Hct=40\%$ , вязкость плазмы, гематокрит (Hct), гемоглобин (Hb), среднюю концентрацию гемоглобина в эритроците (MCHC), показатель агрегации (ПА), число клеток в агрегате (Ч/А) и показатель эффективности транспорта кислорода ( $Hct/\eta$ ) [7].

Цифровые данные обрабатывали в Excel с определением средней арифметической величины и стандартного отклонения по группе ( $M \pm \sigma$ ). Для проверки достоверности различий средних данных в группах использовали Т-тест. Определение взаимосвязи между исследуемыми показателями проводили с использованием корреляционного анализа.

## Результаты

В таблице 1 представлены результаты антропометрии испытуемых. Средние значения длины

тела в сформированных группах существенно не отличались и составили 179-181 см. Масса тела была меньше у представителей второй группы ( $66,5 \pm 8,1$  кг), чем первой ( $72,3 \pm 9,1$  кг) и группы контроля ( $75,9 \pm 7,2$  кг).

Таблица 1

Показатели физического развития лиц с разным исходным уровнем аэробной работоспособности ( $M \pm \sigma$ )

Показатели	Группа 1 (n=13)	Группа 2 (n=11)	Контроль (n=11)
Рост, см	181,5±7,5	179,6±6,1	180,0±3,4
Вес, кг	72,3±9,1	66,5±8,1	75,9±7,2
ВРИ <sup>1</sup>	398,9±45,1	369,2±35,0	420,9±40,6
Динамометрия кистевая	54,3±10,8	42,3±7,0	50,2±5,6
ЖЕЛ, мл	5846,2±870,5	4709,1±637,1	5337,5±750,1
ЖИ	81,0±7,7*	71,7±7,6	70,6±9,1

Обозначения: \* – различия достоверны при  $p < 0,01$ ;

<sup>1</sup> - весо-ростовой индекс (г/см)

Весо-ростовой индекс (ВРИ) также был меньше в группе 2. Наиболее высокие показатели кистевой динамометрии были в первой группе ( $54,3 \pm 10,8$ ), во второй группе и контроле они составили  $42,3 \pm 7,0$  и  $50,2 \pm 5,6$  соответственно. ЖЕЛ в группе контроля составила  $5337,5 \pm 750,1$  мл, у представителей спортивных игр  $4709,1 \pm 637,1$  мл, а у спортсменов, тренирующихся на выносливость,  $5846,2 \pm 870,5$  мл. В контрольной группе данный показатель был равен  $5337,5 \pm 750,1$  мл. При оценке потенциальных возможностей дыхательной системы более информативным показателем является ЖИ. Высокие значения ЖИ были получены в группе 1 ( $81,0 \pm 7,7$ ;  $p < 0,01$ ), тогда как в двух других группах он был существенно ниже ( $71,7 \pm 7,6$  и  $70,6 \pm 9,1$ ).

Частота сердечных сокращений в состоянии покоя у спортсменов первой группы была  $55,4 \pm 7,2$  уд./мин. и была достоверно ниже ( $p < 0,01$ ; табл. 2), чем у представителей второй и третьей групп ( $68,5 \pm 13,5$  и  $69,4 \pm 9,1$  соответственно). Известно, что производительность сердца является одним из факторов, который в значительной мере может лимитировать максимальное потребление кислорода. В результате тренировки, направленной на развитие выносливости, происходит увеличение массы и объема сердца и как следствие этого повышение систолического объема и мощности сокращения миокарда. Одним из проявлений этих изменений является снижение ЧСС в покое. У высококвалифицированных спортсменов-стайеров брадикардия резко

выражена: ЧСС может быть менее 40 уд./мин. [4].

Показатели систолического артериального давления были немного ниже во второй группе (112,8±6,5 мм рт. ст.), чем в первой и контроле (128,4±9,5 и 125,3±6,4 соответственно). Такая же тенденция наблюдалась и для диастолического артериального давления: у представителей спортивных игр его величина составила 61,2±5,6, у спортсменов, тренирующихся на выносливость 74,5±6,9, и в контроле 70,9±10,9 мм рт. ст. При расчете двойного произведения (ДП) меньшие значения были получены в группе спортсменов, тренирующихся на выносливость (70,7±7,2), тогда как во второй группе и особенно в третьей группах этот показатель был заметно выше (77,4±15,8 и 84,3±13,3). Это свидетельствует о более экономичной работе сердечно-сосудистой системы в состоянии покоя у спортсменов первой группы.

Таблица 2

Показатели функционального состояния организма лиц с разным уровнем аэробной работоспособности (M±σ)

Показатели	Группа 1 (n=13)	Группа 2 (n=11)	Контроль (n=11)
ЧСС, уд./мин.	55,4±7,2*	68,5±13,5	69,4±9,1
АДс, мм рт.ст.	128,4±9,5	112,8±6,5	125,3±6,4
АДд, мм рт.ст.	74,5±6,9	61,2±5,6	70,9±10,9
АД среднее	92,3±6,3	78,2±4,2	88,3±8,3
ДП	70,7±7,2	77,4±15,8	84,3±13,3
МПК, л/мин.	4,55±0,43*	3,63±0,45	3,44±0,23
МПК, мл/мин./кг	63,4±6,5*	54,3±4,9	45,7±4,2
Пульсовой критерий экономичности <sup>1</sup>	0,125±0,023*	0,182±0,036	0,186±0,021

Обозначения: \* - различия достоверны при p<0,01;

<sup>1</sup> – пульсовая стоимость преодоления 1Н силы

В результате проведения велоэргометрического теста у испытуемых была определена аэробная работоспособность и рассчитан показатель МПК. У представителей группы 1 он был значительно выше и составил 4,55±0,43 л/мин (p<0,01), во второй группе – 3,63±0,45 и в контроле – 3,44±0,23. Более информативным показателем, характеризующим аэробный потенциал индивида, является МПК, отнесенное к массе тела. Значения этого показателя также были дос-

товерно выше у представителей видов спорта с преимущественным проявлением выносливости (63,4±6,5 мл/мин/кг; p<0,01). Во второй группе он был равен 54,3±4,9, а в группе контроля 45,7±4,2.

При расчете пульсового критерия экономичности [5] получили результаты, свидетельствующие о более эффективной работе сердечно-сосудистой системы во время велоэргометрического теста у представителей первой группы. Пульсовая стоимость преодоления силы, равной 1Н, была равна 0,125±0,023 (p<0,01) ударов в первой, 0,182±0,036 во второй и 0,186±0,021 в контроле. В итоге представители первой группы на пульсе 170 ударов в минуту развили более высокую мощность, чем лица во второй и контрольной группах.

Анализ биомикрофотограмм и измерение диаметров параллельно идущих сосудов с последующим вычислением ABC позволили получить следующие результаты. У представителей видов спорта с преимущественным проявлением выносливости ABC в состоянии покоя был меньше, чем у представителей игровых видов спорта и нетренированных лиц. У первых этот показатель составил 0,47±0,04 отн.ед. (p<0,01), а у вторых и третьих 0,56±0,04 и 0,58±0,07 отн.ед. соответственно (рис. 1). Существующая взаимосвязь между аэробной работоспособностью и ABC выражается коэффициентом корреляции, равным – 0,53, из чего следует, что с ростом показателя МПК существует тенденция к снижению ABC.

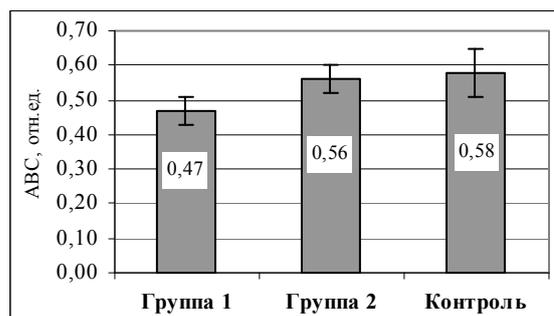


Рис. 1. Соотношение диаметров артериол и венул ABC у лиц с разной аэробной работоспособностью

МЦ представляет собой фундаментальный процесс, определяющий конечную цель функционирования сердечно-сосудистой системы и играющий ключевую роль в трофическом обеспечении тканей и поддержании тканевого метаболизма. Именно на уровне МЦ в наибольшей степени проявляются реологические свойства крови, такие как вязкость цельной крови и плаз-

мы, гематокрит, агрегация и деформируемость эритроцитов. Результаты многих исследований подтверждают, что терминальное сосудистое русло конъюнктивы отражает состояние микроциркуляторной системы в целом. Сравнение результатов микроскопии конъюнктивальных микрососудов и гистологического изучения аналогичных участков конъюнктивальной сосудистой сети, получаемых для исследования путем биопсии, подтверждает достоверность и информативность оценки состояния микроциркуляторного русла методом биомикроскопии [3; 1; 6; 8; 10; 11].

Таким образом, было определено, что у спортсменов-стайеров ABC в состоянии покоя меньше, чем у представителей спортивных игр и нетренированных лиц. Полученные результаты указывают на возможное проявление экономизации функций в состоянии покоя, аналогично снижению ЧСС, у спортсменов, тренирующихся на выносливость, и свидетельствуют о больших резервах адаптации организма к высокоинтенсивным и длительным физическим нагрузкам. При проведении корреляционного анализа была выявлена взаимосвязь между ABC и спортивным стажем в первой группе, коэффициент корреляции составил  $-0,58$ . Это согласуется с данными о функциональных и структурных изменениях в органах и тканях организма спортсмена, происходящих под влиянием тренировки и лежащих в основе роста спортивных результатов.

Исследование реологических характеристик крови показало, что вязкость цельной крови, суспензии эритроцитов и плазмы была ниже в группе с высокой аэробной работоспособностью (табл. 3). Разница в значениях вязкости суспензии эритроцитов со стандартным гематокритом, отражающих способность эритроцитов деформироваться, была особенно выраженной. В первой группе этот показатель составил  $1,64 \pm 0,34$  мПа.с и был достоверно ниже ( $p < 0,01$ ), чем во второй группе ( $2,06 \pm 0,37$  мПа.с) и контроле ( $2,34 \pm 0,47$  мПа.с), что свидетельствует о меньшем сопротивлении эритроцитов кровотоку при прохождении через сосуды, диаметр которых сопоставим с размерами клеток. Особое значение данная способность красных клеток крови приобретает в условиях интенсификации транспорта кислорода в условиях напряженной мышечной деятельности.

Величина Hct – основного показателя, влияющего на текучесть крови, во всех группах была близка к норме, при которой транспорт кислоро-

да и оксигенация тканей оптимальны [7]. Показатели Hb и MCHC в группах были близки по своим значениям. Агрегация эритроцитов в целом у испытуемых была невысокой, но наблюдался большой разброс в индивидуальных данных. Число клеток в агрегате также существенно не отличалось.

При вычислении показателя эффективности транспортной функции крови (Hct/ $\eta$ ) были получены достоверные различия между спортсменами, тренирующимися на выносливость, и представителями двух других групп. У первый он составил  $16,3 \pm 3,2$ , во второй группе  $14,4 \pm 1,6$  и в третьей  $14,1 \pm 1,5$  ( $p < 0,05$ ; табл. 3).

Таблица 3  
Гемореологический профиль лиц с разным уровнем аэробной производительности

Показатели	Группа 1 (n=13)	Группа 2 (n=11)	Контроль (n=11)
$\eta$ цельной крови, мПа.с	$3,03 \pm 0,70$	$3,24 \pm 0,43$	$3,36 \pm 0,34$
$\eta$ суспензии RBC, мПа.с	$1,64 \pm 0,34^*$	$2,06 \pm 0,37$	$2,34 \pm 0,47$
$\eta$ плазмы, мПа.с	$1,88 \pm 0,14$	$1,94 \pm 0,11$	$1,95 \pm 0,11$
Hct, %	$47,4 \pm 2,3$	$47,7 \pm 2,3$	$47,2 \pm 2,5$
Hb, г/л	$156,3 \pm 11,6$	$158,8 \pm 10,6$	$158,0 \pm 12,3$
MCHC, г/дл	$33,0 \pm 2,1$	$33,3 \pm 2,2$	$33,5 \pm 2,6$
ПА, отн.ед.	$0,091 \pm 0,071$	$0,059 \pm 0,032$	$0,098 \pm 0,081$
Число клеток в агрегате	$5,1 \pm 0,8$	$4,9 \pm 0,6$	$5,1 \pm 0,8$
Hct/ $\eta$ цельной крови	$16,3 \pm 3,2^{**}$	$14,4 \pm 1,6$	$14,1 \pm 1,5$

Обозначения: \* - различия достоверны при  $p < 0,01$ ;  
\*\* - различия достоверны при  $p < 0,05$ ;

Известно, что вязкость цельной крови, отражающая ее транспортный потенциал, зависит в основном от четырех определяющих ее факторов, таких как вязкость плазмы, величина гематокрита, агрегация и деформируемость эритроцитов [7]. В ходе проведенного исследования были определены все вышеперечисленные характеристики. Полученные данные свидетельствуют о лучшей текучести крови у спортсменов, тренирующихся на выносливость, главным образом за счет высокой деформируемости эритроцитов. У представителей спортивных игр и нетренированных лиц реологические характеристики существенно не отличались.

### Заключение

- У лиц с высокой аэробной работоспособностью показатели ЧСС в состоянии покоя и при выполнении стандартной нагрузки были ниже, а ЖИ выше, чем у лиц с меньшей аэробной производительностью, что свидетельствует о более высоких функциональных возможностях кардиореспираторной системы у первых.

- У спортсменов, тренирующихся на выносливость АВС, как показатель резерва дилатации артериол, в состоянии покоя был меньше, чем у представителей спортивных игр и нетренированных лиц, что может являться проявлением экономизации функций в покое у первых и свидетельствует о больших резервах адаптации организма к высокоинтенсивным и длительным физическим нагрузкам.

- Сниженная вязкость цельной крови, плазмы, суспензии RBC и повышенный показатель Hct/η указывают на более эффективную транспортную функцию крови у представителей видов спорта на выносливость, чем у игроков и нетренированных лиц. В двух последних группах вышеперечисленные показатели существенно не отличались.

### Библиографический список

1. Буркин, И.И. Динамика состояния микроциркуляции у больных стенокардией напряжения [Текст]: автореф. дис. ...канд. мед. наук: 14.00.06 / И.И. Буркин. – М., 1998. – 25 с.

2. Волков, В.М., Миллер, Е.Г. Человек и бег [Текст] / В.М. Волков, Е.Г. Миллер. - М.: ФиС, 1987.

3. Волосок, Н.И. Морфологические критерии оценки состояния микроциркуляторного русла конъюнктивы глазного яблока и их диагностическое значение [Текст]: автореф. дис. ...канд. мед. наук: 14.00.15 / Н.И. Волосок. – М., 1980. – 24 с.

4. Карпман, В.Л., Любина, Б.Г. Динамика кровообращения у спортсменов [Текст] / В.Л. Карпман, Б.Г. Любина.- М.: ФиС, 1982. – 135 с

5. Кулаков, В. Зачем нужен пульсометр [Текст] / В. Кулаков // Легкая атлетика. - 1989. - № 11. - С. 6-7.

6. Малая, Л.Т. Микроциркуляция в кардиологии [Текст] / Л.Т. Малая, И.Ю. Микляев, П.Г. Кравчун. – Харьков: Выща школа, 1977. – 232 с.

7. Муравьев, А.В., Чепоров, С.В. Гемореология (экспериментальные и клинические аспекты реологии крови) [Текст]: монография / А.В. Муравьев, С.В. Чепоров.- Ярославль: Изд-во ЯГПУ, 2009.-54 с.

8. Петрищев, Н.Е., Власов, Т.Д. Функциональное состояние эндотелия при ишемии-реперфузии [Текст] / Н.Е. Петрищев, Т.Д. Власов // Рос. физиол. журн. им. И.М. Сеченова. – 2000. – Т. 86, № 2. – С. 148-163.

9. Сиротин, Б.З., Жмеренецкий, К.В. Микроциркуляция при сердечно-сосудистых заболеваниях [Текст] / Б.З. Сиротин, К.В. Жмеренецкий. – Хабаровск, 2008.

10. Струков, А.И. Нарушения микроциркуляции [Текст] / А.И. Струков // Общая патология человека. – М.: Медицина, 1982. – С. 237-246.

11. Bjork V.O., Intont F., Nordlund S. Correlation between sludge in the bulbar conjunctiva and mesentery // Ann. Surg. – 1964. – V. 159. – P. 428-431.

12. Hermansen I, Wachtlova M. Capillary density of skeletal muscle in well-trained and untrained men // Journal of Applied Physiology. – 1971. – V. 30. – P. 160-163.